

Твердые отходы селитебных территорий

К рассматриваемым материалам можно отнести две большие группы: твердые бытовые и медицинские отходы. Первые на селитебных территориях являются наиболее крупномасштабными, вторые весьма опасны.

13.1. Твердые бытовые отходы

13.1.1. Общие сведения

В городах мира ежегодно образуется около 500 млн т ТБО, или 200-500 кг на каждого их жителя. К ним относят не только отходы, производимые населением, но и торговыми предприятиями, ресторанами, учреждениями, муниципальными службами. Наибольшее образование отходов в последнее десятилетие прошлого века наблюдалось в США (более 200 млн т/год) и России (130 млн м³ в 2004 г.). В нашей стране для их размещения ежегодно отчуждается 10 тыс. га пригодных для использования земель.

Твердые бытовые отходы представляют собой гетерогенную смесь сложного химического и морфологического состава (черные и цветные металлы, макулатура, текстиль, стекло, пластмассы, пищевые и растительные отходы, камни, кости, резина, кожа, дерево, уличный смет и пр.).

В последние десятилетия в связи с увеличением ассортимента товаров народного потребления химический состав ТБО усложнился. Масса органических веществ в отходах достигла 80%. Это привело к увеличению их теплоты сгорания (в России с 3000 до 6000-9000 кДж/кг в сравнении с 60-ми гг. 20 в.). Элементный состав ТБО также подтверждает преобладание в них органических материалов, %:

| Элемент ТБО | С | Н | О | N | S | Влага | Зола | Летучие |
|-------------|------|-----|------|-----|-----|-------|------|---------|
| Европа | 26 | 3,5 | 21 | 0,6 | 0,1 | 28-40 | 21 | 37-65 |
| Россия | 19,2 | 2,6 | 15,3 | 0,5 | 0,2 | 54,7 | 10,5 | 65,9 |

Усредненный вещественный состав ТБО на начало 90-х гг. прошлого столетия представлен в табл. 13.1. Ее данные показывают, что состав мусора, образующегося в разных странах, примерно одинаков, в частности близко соотношение между органическими и неорганическими веще-

ствами. Вместе с тем следует отметить, что в отходах возрастает содержание пластмасс, бумаги, картона, редких элементов, используемых в электронной аппаратуре, уменьшается доля золы и шлака.

Таблица 13.1

Типичный состав ТБО, % (Исаева...)

| Вид отходов | Россия | ЕС | США |
|--------------------------------|--------|------|------|
| Органические вещества | | | |
| Бумага, картон | 37,0 | 16,0 | 42,0 |
| Пищевые отходы | 30,0 | 29,9 | 12,0 |
| Деревья, листья | 2,0 | — | — |
| Текстиль | 5,5 | 2,0 | 0,6 |
| Шерсть | — | — | 2,4 |
| Кожа, резина | 0,5 | — | — |
| Полимерные материалы | 5,5 | 5,4 | 1,6 |
| Уличные отходы | — | — | 15,0 |
| Прочие | — | 26,1 | — |
| Итого: | 80,5 | 79,4 | 73,6 |
| Неорганические вещества | | | |
| Кости | 1,0 | — | — |
| Металлы черные | 3,3 | 2,8 | 4,0 |
| Металлы цветные | 0,5 | 0,4 | 4,0 |
| Стекло | 4,0 | 9,2 | 6,2 |
| Камни, керамика | 1,0 | — | 11,0 |
| Зола, шлак | 9,7 | — | — |
| Прочие | — | 7,2 | 1,4 |
| Итого: | 19,5 | 20,6 | 26,4 |

Примечание: ЕС — европейские страны.

Усложнение состава твердых бытовых отходов и возрастание в них доли углерода и углеродсодержащих соединений обуславливают увеличение количества различных поллютантов, в том числе таких супертоксичных, как диоксины и фураны. Они образуются при разложении, сжигании, переработке отходов и создают значительные токсикологическую и санитарно-гигиеническую проблемы.

В мировой практике известно более 20 методов обезвреживания и утилизации ТБО. Подавляющее их количество вывозится для хранения на полигоны, %: США — до 80; ЕС — 75; Великобритания — 90; Германия — 70; Япония — 30; Россия — 95. Однако в настоящее время назрела необходимость сокращения объемов захоронения отходов на полигонах. Для этого имеется ряд веских причин: недостаток земельных площадей, большие транспортные расходы, потеря ценных

компонентов, неблагоприятная экологическая обстановка в районах расположения полигонов. В частности, под ТБО России занято до 100 тыс. из 300 тыс. га площадей под всеми отходами. Следует учесть также, что площадь загрязненных земель, прилегающих к полигонам, в десятки раз превышает размеры последних (Гумарова...). По этой причине западноевропейские страны планируют отказ от полигонного захоронения необработанных ТБО к 2006 г. (Ende...).

В связи с изложенным все более актуальной становится промышленная переработка ТБО, в совокупности решающая вопросы их обезвреживания, ликвидации и использования. В настоящее время переход от полигонного захоронения к промышленной, точнее — индустриальной, утилизации является основной тенденцией решения проблемы ТБО в мировой практике. Однако в России захоронение отходов на полигонах еще долгое время будет доминировать, так как решение проблемы их промышленного использования требует больших капитальных вложений, весьма дефицитных в данный период нашей истории. При этом промышленную переработку следует рассматривать как конечную операцию в общей схеме санитарной очистки города. Ее эффективность во многом зависит от организации каждой из предшествующих стадий (сбор, транспортировка, удаление, обезвреживание), всей системы в целом.

В первую очередь твердые бытовые отходы вовлекают в утилизацию в странах с малой площадью и высокой плотностью населения. В частности, она наиболее развита в Японии и Швейцарии — в нее поступает около 70% массы этих отходов.

Для переработки чаще всего применяют термические методы, в основном сжигание.

Реже используют технологии анаэробной ферментации органической части отходов с получением и утилизацией биогаза, как правило, непосредственно на полигоне. Практикуют также их компостирование (аэробную ферментацию).

Однако современным экономическим и экологическим требованиям в наибольшей степени соответствует комплексная переработка ТБО, включающая комбинирование процессов сортировки, термо- и биообработки.

Степень использования отходов потребления существенно различна для отдельных стран и регионов, составляя, %: 30 США, 35-40 Западная Европа, до 60 Япония, 3-5 Россия (Концепция... №6). Ожидается расширение рынка в этом секторе: с 860 млн дол. в 1998 г. до 1,55 млрд в 2005 г. (Siedlungsabfallwirtschaft...).

13.1.2. Получение биогаза

Как уже отмечалось, количество ТБО, ежегодно образуемых в городах, достигает 500 млн т. Основная масса их (300-350 млн т) поступает на полигоны и стихийные свалки. Площадь отдельных полигонов колеблется от единиц до сотен гектаров, в сумме составляя более 140 тыс. га. Эти объекты предназначены в основном для захоронения отходов и не предусматривают специальной переработки последних. Объем свалок ежегодно возрастает на ~6%, т.е. в 3-4 раза быстрее, чем народонаселение. На местах крупных свалок зачастую (как и при получении энергии из биомассы или утилизации канализационных осадков) оказывается экономически выгодным наладить промышленное использование биогаза.

Основой газосборной системы являются вертикальные скважины, шахтные колодцы или горизонтальные газоприемные трубопроводы, уложенные в толще отходов. Днище, борта и кровлю полигонов в участках газовыделения необходимо изолировать.

За рубежом накоплен большой опыт создания надежной гидроизоляции полигонов. Достаточно распространенный ее вариант сводится к следующему. На искусственное песчаное ложе укладывается покрытие из пленки толщиной 2,2 мм. На ней формируется дренажный гравийный слой с разветвленной системой труб (диам. 40 мм) из ПВХ. На дренажный слой укладывается пленочное покрытие толщиной 2,5 мм. Полигон разбивают на карты размером 100×100 м. В центре каждой из них устанавливается шахта диаметром до 3 м с телескопически наращиваемой по мере повышения уровня отходов верхней частью для сбора и откачки дренажных сточных вод. К шахте подводят также разветвленную систему труб из ПВХ, уложенных между двумя слоями пленочного покрытия. При нарушении целостности его верхнего слоя дренажные воды по трубам начинают поступать в шахту, сигнализируя о масштабах разгерметизации. При превышении определенной интенсивности поступления сточных вод пространство между слоями пленочной изоляции герметизируют, нагнетая по трубам цементно-глинистое расширяющееся вяжущее. Данная система хорошо зарекомендовала себя на полигоне с расчетным объемом отходов 20 млн м³ (Воеckh).

Обычная свалка может выдавать газ в течение 10-12 лет. Максимум производительности приходится на четвертый год, потом она медленно снижается.

После окончания эксплуатации скважины, т.е. с момента, когда отбор биогаза становится экономически нецелесообразным вследствие невысокой концентрации метана, необходим контроль за выделением и

обезвреживанием его остаточного количества. Один из способов обезвреживания состоит в окислении метана воздухом в поверхностных слоях почвы в присутствии бактерий. Как следствие, образуется углекислый газ, поступающий в атмосферу.

В настоящее время как газовые месторождения эксплуатируется более 150 полигонов ТБО, расположенных в 15 странах мира. Большая их часть (80%) находится в США, Великобритании, Германии.

Основное направление утилизации биогаза — применение в качестве топлива на установках сжигания, общее количество которых в мире превышает 480. Имеются также достаточно крупные установки, использующие его для выработки электроэнергии. Так, на испанском заводе «Cogersa», сжигая до 40 млн м³/год биогаза, получают 30 млн кВт·ч; на электростанции в г. Бохум (Германия) для производства электроэнергии сжигают ~14 млн м³/год биогаза центральной мусорной свалки. В России сбор и утилизация биогаза впервые были организованы в 1996 г. (на свалках гг. Мытищи и Серпухов).

Известны и другие направления утилизации биогаза полигонов. В частности, с 1983 г. фирма «Блю Серкл» (США) применяла газ из хранилищ отходов для обжига цемента. В Великобритании имеются установки по обжигу цемента и кирпича, работающие на биогазе из хранилищ мусора. Его используют также в качестве топлива для печи плавления отходов с последующим их остеклованием (Trepand).

С целью улучшения качественных характеристик биотоплива его перед подачей потребителям желательно очистить от влаги, сероводорода и диоксида углерода, применяя методы селективной адсорбции, мембранных технологий и др.

Вместе с тем полигоны, особенно недостаточно оборудованные, являются источником загрязнения окружающей среды, прежде всего почвы и подземных вод. Так, при обследовании 27 полигонов и свалок Московской области было выявлено, например, загрязнение первого водоносного горизонта под Хметьевским полигоном и на расстоянии 400-450 м от него повышенными концентрациями алюминия, хрома, бария, титана, олова. Практически все подземные воды оказались токсичными (загрязненными), а поверхностные — высокотоксичными (Грибанова...).

Для очистки дренажных стоков полигонов, по зарубежным данным, широко используют физико-химические (радиохимические, сорбция, обратный осмос и др.), химические (окислительные) и биохимические методы.

Заключительной операцией в полном жизненном цикле полигона является рекультивация его площадей после закрытия, которая может быть весьма эффективна (Кн.2, разд. 7.2.2).

Вместе с тем, как уже отмечалось (разд. 13.1.1), в перспективе неизбежен переход от полигонного захоронения ТБО к их промышленной переработке. В частности, в Германии, Бельгии, Франции и ряде других стран разработаны технологии получения биогаза из органической фракции, выделенной из отходов при их обогащении на заводах.

В процессах заводской анаэробной ферментации (сбраживания) в качестве товарной продукции получают не только биогаз, но и компост. Герметичность установок анаэробной переработки отходов обеспечивает соблюдение экологических и санитарных норм реализации этого процесса.

В 1998 г. в Амьене (Франция) вошел в строй завод производительностью 110 тыс. т/год твердых бытовых отходов, работающий по системе «Valogra». Технология включает следующие операции: сортировку исходных ТБО (выделение металлов, удаление крупногабаритных частиц инертных отходов), анаэробное сбраживание органических веществ в ферментационных баках (дижестерах) с получением биогаза и специфической массы «Digestat». После очистки последней от примесей (стекло, текстиль, дерево, пластмасса и др.) и ее сортировки получают новый вид удобрения. Он существенно отличается от компоста (более сходен с перегноем), продается в виде гранул размером около 10 мм и используется как дополнение к минеральным удобрениям. Его состав, %: 30-35 органического вещества; 10-12 углерода; 0,8-0,9 азота; 1,3 оксида калия; 5,3 кальция; по 0,3 магния и пентаоксида фосфора при влажности 40-65%. Из 100 т отходов, используя технологию «Valogra», можно получить 13-15 т газа, 35-40 т удобрений. Остаток отходов составляет 10-20% от их исходной массы (Концепция... № 6).

13.1.3. Аэробная ферментация

Аэробная ферментация, или компостирование, является одним из наиболее распространенных в мировой практике бестермических методов переработки твердых бытовых отходов, основанных на биохимическом разложении их органической части микроорганизмами.

В процессе ферментации выделяется тепло с саморазогревом материала до 60-70°C и уничтожением большей части болезнетворных микроорганизмов, яиц гельминтов и т.п., образованием диоксида углерода и водяного пара, а также твердого стабилизированного органического продукта переработки. Последний называют компостом, если он применяется в сельском хозяйстве. При ферментации масса биоразлагаемого материала уменьшается вдвое.

Стабилизированный органический продукт может быть использован не только в сельском хозяйстве, но и в других далее отмеченных на-

правлениях. С получением компоста в различных странах перерабатывается не более 5% ТБО.

Наиболее интенсивно компостирование твердых бытовых отходов, начиная с 50-х гг. прошлого столетия, развивалось в Западной Европе. В конце 20 в. в ней с применением аэробной ферментации ежегодно перерабатывали около 4,5 млн т отходов более чем на 100 заводах, из которых 60 было построено в 1992-1995 гг.

Прямое компостирование исходных ТБО без их предварительной сортировки связано с загрязнением почвы тяжелыми цветными металлами. Так, в СССР, по данным исследований, компост в сравнении с фоновыми почвами мог быть значительно обогащен ртутью (в 833 раза), кадмием (21), свинцом (18), медью (17), сурьмой (64), цинком (30). При использовании такого материала в сельском хозяйстве на полях, им удобренных, содержание металлов оказывалось выше, чем на контрольных участках.

Нормы РФ допускают суммарную концентрацию тяжелых металлов в компосте не более 1,45 г/кг сухой массы и стекла крупностью -10+3 мм — не более 1,7%.

Компост, получаемый из ТБО в соответствии с европейскими нормами, может иметь содержание тяжелых металлов не более 752,5 мг/кг сухой массы. Реальная концентрация их составляет 1,8-3,3 г/кг, т.е. превышает допустимые в 2-5 раз (механические примеси стекла в европейском компосте не допускаются). Поэтому компост из твердых бытовых отходов или его обогащенных фракций рекомендуется применять не столько в сельском хозяйстве, сколько в лесных питомниках, при озеленении, рекультивации земель, в технологиях полигонного захоронения ТБО в качестве покрывающего материала, как заполнитель при покрытии заболоченных земель, для получения этанола, как подготовленное топливо для производства энергии (Концепция... № 6).

Почти во всех европейских странах, вследствие ужесточения требований к составу компоста, используют только образуемые при отдельном сборе или выделенные фракции с высоким содержанием биоразлагаемых и низким — экологически опасных компонентов, прежде всего металлов. При этом отделение содержащейся в отходах биологически активной фазы от инертной производят без изменения биологического состава отходов: удаляют отработанные батарейки, люминесцентные лампы, краски, ядовитые вещества, металлы и пр. (разд. 13.1.5).

В промышленности распространены три метода аэробной ферментации: *в биобарабанах, туннельное, в бассейне выдержки.*

Данные указывают на отчетливо выявившуюся в последние годы тенденцию перехода от компостирования в биобарабанах к компостированию

в туннеле и бассейне выдержки. Из 60 построенных в 1992-1995 гг. заводов биобарабаны были установлены только на десяти (табл. 13.2).

Таблица 13.2

Технологии аэробной ферментации ТБО

| Метод | Всего на 1995 г. | | Введено в 1992-95 гг. | |
|----------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| | число заводов | мощность | число заводов | мощность |
| В биобарабанах | 36 | Около 1 млн т | 10 | 360 тыс. т |
| Туннельное компостирование | 38 | Около 1,5 млн т | 21 | Около 1 млн т |
| В бассейне выдержки | 35 | Около 2 млн т | 29 | 1,75 млн т |
| Всего | 109 | ~4,5 млн т | 60 | ~3,1 млн т |

Целый ряд зарубежных фирм отказался от барабанов и перешел на новые технологии. В то же время в СССР и затем России с 1971 г. практикуется компостирование только в биобарабанах. Последние представляют собой крупные вращающиеся агрегаты (диам. до 6 и длина до 60 м).

В СССР в 1971-1987 гг. было построено 8 заводов прямого компостирования исходных ТБО, из которых к настоящему времени осталось только два (Шубов). При практически неизменной технологии они оснащены однотипным оборудованием для компостирования в биобарабанах, очистки компоста от примесей и его складирования. Кроме того, на некоторых заводах предусмотрена термическая обработка (сжигание, пиролиз) некомпостируемой фракции.

В 1994 г. в Санкт-Петербурге был пущен завод механизированной переработки твердых бытовых отходов (МПБО-2). Его схема предусматривает предварительную сортировку ТБО перед компостированием. Мощность завода по отходам 120 тыс. т/год. Ее планировалось увеличить до 300 тыс. т.

На МПБО-2 из твердых бытовых отходов магнитной сепарацией извлекается лом черных металлов. Выделяют также цветные металлы, стекломой, текстильные отходы, картон, бумагу. После биобарабанов компост поступает на две технологические линии, на которых его грохотят и измельчают. Он, кроме углерода, содержит ряд других усвояемых веществ, %: 1 азота; 0,6 фосфора; 0,3 калия; 2,5 кальция.

Основные недостатки ферментации в биобарабанах:

бесконтрольность процесса;

плохой товарный вид конечной продукции;

потребность в большой площади для дозревания компоста: в течение двух суток пребывания ТБО в барабане их ферментация только начинается, о чем свидетельствует потеря массы биоразлагаемого вещества на выходе из аппарата, не превышающая 3-4%.

Наиболее прогрессивны в настоящее время технологии аэробной ферментации в *бассейне выдержки* (швейцарская фирма «Buhler») и *туннельного компостирования*.

Отличие этих технологий друг от друга заключается в том, что в бассейне выдержки материал находится 4-6 недель, а в туннеле — 7-10 суток. Соответственно в первом случае процесс ферментации заканчивается полностью с получением сухого стабилизированного продукта (потеря исходной массы 50%), а в туннеле образуется полупродукт (потеря массы 20-30%, конечная влажность 30%).

Технологический процесс в бассейне выдержки поддается полной автоматизации и непрерывно контролируется (температура, расход воздуха на аэрацию, влажность). Образование в нем сухого продукта обеспечивает эффективную очистку стабилизированной органической фракции от механических примесей (применение комбинации процессов грохочения и аэросепарации).

Вместе с тем, если не предполагается выдача продукта для сельскохозяйственного использования, предпочтительнее применять ферментацию в туннеле. В таком случае эта технология рассматривается как ферментативная сушка, обеспечивающая обезвреживание, измельчение и гомогенизацию образующегося полупродукта. Материал после туннельного компостирования в большей степени обогащен углеродом в сравнении с обработкой в бассейне выдержки. Это делает его предпочтительным в последующих процессах термической переработки (сжигание, газификация и др.). Он же пригоден для получения спирта, использования в производстве стройматериалов.

Помимо трех основных, известны и другие способы аэробной ферментации твердых бытовых отходов.

По технологии фирмы «Alphesco Ltd» (Великобритания) утилизация ТБО с получением компоста как конечного продукта предусматривает первоначальное прогревание исходного материала в закрытых контейнерах при 45-65°C. Из образующегося при этом полупродукта на следующей стадии удаляют влагу, при необходимости аэрируя его. Общая длительность процесса не превышает 3 месяцев, производительность установки составляет более 6 тыс. т/год (Enclosed...).

Предложен способ разрушения биологических отходов, находящихся в копнах или скирдах. По этому способу исходную влажность скирды доводят до 60-70%, затем скирду покрывают водоотталкивающим брезентовым навесом, проницаемым для воздуха, на котором

находятся адсорбент или смесь адсорбентов для поглощения вредных веществ и/или запахов. Аэрация покрытой скирды осуществляется с помощью вентилятора и системы распределения воздуха, отдельные элементы которой проходят через скирду снизу. На 1 м^3 ее за час подается 0,5-0,8-кратное количество воздуха. К скирде добавляют также жидкую бактериальную питательную среду, содержащую полиуроновые кислоты, с добавлением вспомогательных средств. Температуру скирды поддерживают в пределах $50-80^\circ\text{C}$ (Helmut...).

Перспективна применяемая в ряде стран технология *вермикомпостирования* (Франция, Канада, США, Япония, Индия). Ее суть — разведение дождевых червей на отходах, включая твердые бытовые (Ponsard). Способ основан на биологической способности червей перерабатывать в процессе своей жизнедеятельности большое количество органических остатков. При этом часть токсичных тяжелых металлов переводится в малоподвижные формы.

При реализации вермикомпостирования перерабатываемая масса укладывается в бурты высотой 0,4-0,5 м, которые хорошо аэрируются, периодически перелопачиваются и увлажняются (до 65-75%). В массу вносится 1-2 кг/м² червей. В процессе жизнедеятельности плотность их заселения достигает 30 тыс. единиц на 1 м^3 или до 2,5 кг/м². Органический продукт, получаемый через 3-4 месяца, по ряду показателей превосходит компост традиционных методов. Кроме того, дождевые черви могут применяться как высокопротеиновая добавка в корм скота и птицы (Туровский...; Gaikwad...). Она же после соответствующей очистки может быть использована в качестве пищевой добавки к рациону человека (Вермокомпостирование...).

В заключение отметим, что в ряде случаев в компост перерабатывают смесь твердых бытовых отходов и осадков сточных вод.

13.1.4. Термические методы утилизации

13.1.4.1. Сжигание

Первое «мусоросжигательное заведение» было построено в 1870 г. близ Лондона. В настоящее время сжигание является одним из наиболее распространенных и технически отработанных методов промышленной утилизации ТБО. В ЕС таким образом утилизируют 20-25% объема городских отходов, в Японии — около 65 и в США — 15%. В последних в 1995 г. насчитывалось более 150 мусоросжигательных установок (МСУ), в России из 10 ранее действовавших осталось четыре (Шубов).

Основные преимущества термической переработки: снижение объема отходов до 10 раз, их эффективное обезвреживание, использование энергетического потенциала органической части твердых бытовых отходов.

Последнее обстоятельство стало особенно привлекательным с наступлением энергетического кризиса 70-х гг. 20 в. Автором подсчитано, что при сжигании 1 т ТБО при 100% КПД можно получить 1300-1700 кВт·ч электроэнергии или около 5 ГДж тепловой энергии. В Западной Европе сжигание всех образующихся отходов достаточно для покрытия 5% тепловой энергии для бытового сектора. В Швеции вырабатываемое на мусоросжигательных заводах (МСЗ) тепло составляет 13% потребности в ней этого сектора.

В 1996 г. в мире действовало около 2400 заводов по сжиганию ТБО или выделенных из них горючих фракций. На 400 из них получали пар и электроэнергию.

Самую большую в мире МСУ должны были ввести в действие в 2006 г. в Амстердаме (Нидерланды). Общий объем переработки отходов на ней составляет 1,3 млн т/год, с мощностью по выработке электроэнергии 140 МВт (Ingenieur...).

Большинство европейских МСЗ имеет производительность 170-800 т/сут. по отходам. На них преимущественно используются котлоагрегаты небольшой и средней мощности (5-15 т/ч пара).

Вместе с тем хорошо известны основные недостатки сжигания. Так, в его слоевом варианте из 1 т ТБО выделяется значительное количество (4,5-6,0 тыс. м³) газов. Образуется также 700-1100 м³ пара, 200-400 кг шлака и 20-50 кг летучей золы. Эти недостатки обуславливают основную тенденцию развития термических методов — переход от прямого сжигания неподготовленных отходов к сжиганию извлеченной из них горючей (топливной) фракции. Как следствие, снижаются количества отходящих газов, шлаков, золы, повышается теплотворная способность утилизируемой части.

В настоящее время предложены десятки термических способов переработки отходов. Те из них, которые применяются в промышленности или прошли опытную апробацию, можно разделить на две группы: процессы при температурах ниже, чем интервалы расплавления шлака, или соответствующие этим интервалам.

К первой группе относятся слоевое сжигание с принудительным перемешиванием и перемещением материала (на переталкивающих и валковых решетках, во вращающихся барабанных печах), а также в кипящем слое (стационарном, вихревом, циркулирующем).

Во вторую группу входит сжигание в барботируемом шлаковом расплаве на обогащенном кислородом дутье (процесс Ванюкова).

Термические процессы первой группы осуществляют при температурах менее 1300°C (обычно $900-1000^{\circ}\text{C}$) и используют достаточно часто. Из них наиболее распространенным применительно к переработке неподготовленных смешанных отходов является сжигание на *подвижных* решетках.

Печи с подвижными *переталкивающими* решетками (как с прямой, так и с обратной подачей материала) представляют собой систему, состоящую из подвижных и неподвижных колосников.

Колосниковые решетки с прямой подачей, т.е. *поступательно-переталкивающие*, имеют малый угол наклона ($6-12,5^{\circ}$) и перемещают материал в сторону выгрузки шлака (в направлении передвижения сжигаемой массы). Колосниковые решетки с обратной подачей (*обратно-переталкивающие*) имеют больший угол наклона (обычно $21-25^{\circ}$) и передвигают *нижний слой* отходов в сторону, противоположную выгрузке шлака и перемещению их остальной массы. При этом часть горящего слоя ТБО возвращается к началу решетки, интенсифицируя процесс горения.

Печи с подвижными *валковыми* решетками применяются в промышленной практике достаточно широко. В 1995 г. в различных странах эксплуатировалось более 250 топок такой конструкции. При их использовании материал перемещается вращающимися валками (барбанами); наиболее часто применяются шестивалковые решетки. Угол наклона последних до 40° , диаметр валков до 1,5 м, их длина до 6 м. Время нахождения отходов в печи около 30 мин. Топки этой конструкции работали на шести МСЗ, построенных в различных городах СССР в 1984-1988 гг.

Одна из конструкций печей с валковой решеткой фирмы «Дукла» (б. Чехословакия) представлена на рис. 13.1. В ней воздух 1 для сжигания, имеющий температуру $350-450^{\circ}\text{C}$, подается снизу через решетку и слой отходов. Горение осуществляется при $\sim 800^{\circ}\text{C}$, в основном за счет теплоты сгорания ТБО.

Эксплуатация агрегатов подобного типа связана с определенными трудностями: засорение и зашлаковывание решеток, обусловленное неполным выгоранием частиц отходов в сочетании с высокой долей провала; неравномерное по высоте и длине слоя сжигание при недостаточном перемешивании материала, что приводит к появлению зон с низкими температурами горения, для которых характерно повышенное образование вредных соединений; значительная строительная высота установки.

В целом сжигание в конструкциях с подвижными решетками обычно не соответствует современным требованиям, предъявляемым к установкам, ориентированным на сжигание ТБО и обезвреживание опасных отходов.

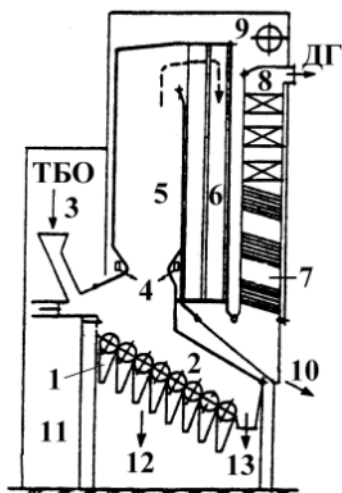


Рис. 13.1. Мусоросжигательный котел с валковой решеткой фирмы «Дукла»:

ТБО — твердые бытовые отходы; ДГ — дымовые газы, направляемые в систему газоочистки; 1 — короба подачи первичного воздуха; 2 — валковая решетка; 3 — питатель ТБО; 4 — сопла вторичного воздуха; 5 — топочная камера; 6 — пароперегреватель; 7 — экономайзер; 8 — воздухоподогреватель; 9 — барабан котла; 10 — система золоудаления; 11 — опорные конструкции котла; 12 — провал шлака; 13 — шлак в вагонетку

Слоевое сжигание ТБО в барабанных вращающихся печах (разд. 1.5.1.1) применяется редко. Однако в 1995 г. современная установка такого типа была запущена на предприятии «Вауег» в Дортмген (Германия). Ее производительность по отходам составляет 45 тыс. т/год при стоимости 200 млн марок. Установка (первая из всех аналогов) отвечает требованиям германского законодательства по охране окружающей среды от загрязнений. Помимо барабанной печи с температурой сжигания 900°C, она включает камеру дожигания, работающую при 1200°C. Из последней отходящие газы поступают в котел-утилизатор с часовой производительностью 20-25 т пара, а затем на мокрую газоочистку с последующим деазотированием и деструкцией диоксинов до остаточных концентраций 0,1 нг/м³. Почти все из 4 тыс. т шлаков установки утилизируются при строительстве дорог и как дренирующий материал на полигоне предприятия. Такое же количество не утилизируемых отходов газоочистки подлежит захоронению (Die...).

Сжигание ТБО в кипящем слое впервые реализовано в начале 70-х гг. 20 в. в Японии, где в настоящее время на его долю приходится около 25% этих материалов. Их перерабатывают в агрегатах со стационарным КС. Общие особенности данного варианта рассмотрены ранее (разд. 1.5.1.1). Производительность таких печей составляет 3-25 т/ч при преобладающей температуре сжигания 850-920°C.

В печах с вихревым кипящим слоем его характер определяют пластины, наклоненные по отношению к желобу системы шлакоудаления. Первичный воздух подается в топку через несколько воздухопроводов, причем скорость его потока возрастает по направлению к желобу шла-

коудаления. Действие воздушного потока с различной скоростью приводит к эллиптическому (в горизонтальном плане) движению КС.

Различают одно- и двухветвевой кипящий слой. В последнем случае (рис. 13.2) два вращающихся в противоположных направлениях эллиптических потока воздуха соприкасаются в середине печи, что обеспечивает оптимальное распределение и ворошение отходов. Благодаря этому достигается их более чем 99%-е сгорание и предотвращение подпора при загрузке новых отходов.

Для достижения полного сгорания летучих в зону высокой турбулентности подается вторичный воздух (на рисунке не показан). Здесь он интенсивно смешивается с горючими газами, что способствует их дожиганию в расположенном выше реакционном пространстве с температурой 850°C. Продолжительность пребывания газа в печи составляет 5 с (Шубов... №5).

Печи с *циркулирующим кипящим слоем* установлены на заводе «Робинз» в Чикаго, введенном в эксплуатацию в 1997 г. (производительность 500 тыс. т/год). Крупность загружаемого в печь материала 100 мм, минимальная теплотворная способность около 2450 ккал/кг (рис. 13.3).

Эффективность сжигания в циркулирующем КС обеспечивается хорошим контактом топлива из отходов с горячим песком, заполняющим печь на 1/3 объема. Материал циркулирует в системе печь-циклон, и по всей высоте печи поддерживается равномерная температура 830-920°C, относительно более низкая, чем в котлоагрегатах со стандартными решетками. Это снижает выбросы оксидов азота на 25-40%

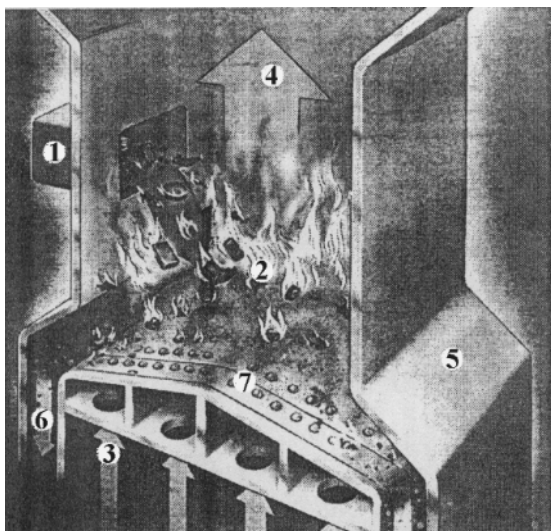


Рис. 13.2. Сжигание отходов в двухвихревом кипящем слое:

- 1 — загрузка отходов;
- 2 — два вращающихся вихревых потока;
- 3 — подвод первичного дутья;
- 4 — отходящие газы;
- 5 — стенки топочного пространства;
- 6 — удаление шлака;
- 7 — сетка с отверстиями для подачи воздуха

и коррозионное действие хлора. Отсортированную и дробленую фракцию (топливо из отходов) загружают в переднюю часть печи. Воздушные дутья нагревают до $300-350^{\circ}\text{C}$ и подают в печь в нескольких точках (на рис. 13.3 показана одна). Из печи отходящие газы с температурой $750-800^{\circ}\text{C}$ попадают в циклон, где осажается шлак. Продолжительность пребывания газов в печи составляет около 4 с.

Вторая группа термических методов, т.е. реализуемая в шлаковых расплавах, пока не прошла промышленной апробации, за исключением процесса Ванюкова.

Как уже отмечено, сжигание в слое барботируемого шлакового расплава с использованием обогащенного кислородом дутья составляет суть процесса Ванюкова, или русской плавки (*Ромелт*). Изначально он разрабатывался применительно к плавке сульфидного сырья цветной металлургии, где в настоящее время широко используется (Кн. 1, разд. 6.4.1).

Наиболее очевидное преимущество обогащения дутья кислородом — уменьшение количества отходящих газов за счет снижения в них доли азота, с которой из печи выносятся значительная часть тепла. Это сокращает также затраты на газоочистку, количество образующихся при высоких температурах оксидов азота — загрязнителей окружающей среды.

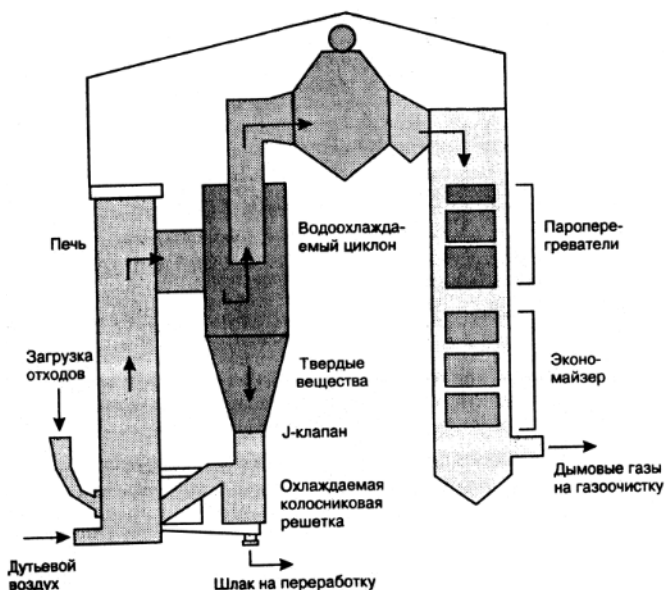


Рис. 13.3. Печь для сжигания отходов в циркулирующем кипящем слое

Применительно к твердым бытовым отходам процесс Ванюкова испытан в печи с площадью пода $\sim 3 \text{ м}^2$ опытного завода института «Гинцветмет» (г. Рязань). Загрузка отходов в печь производилась вручную (Гречко... 1993). Их сжигание, как и при переработке сульфидного сырья, осуществлялось в барботируемом дутьем шлаковом расплаве. Кислородно-воздушное дутье вдувалось через фурмы в нижней части боковых стенок печи (ниже уровня расплава). Дожигание отходящих газов осуществлялось подачей дутья через ряд верхних фурм, расположенных выше уровня расплава.

Было установлено, что при переработке ТБО с равномерной загрузкой обеспечиваются полное сгорание, проплавление их составляющих и дожигание газов. При этом практически не отмечалось существенных «хлопков» при загрузке влажного сырья на барботируемую ванну.

Положительные результаты испытаний по утилизации твердых бытовых отходов в печи Ванюкова не исключают необходимости более детальной проверки этого способа в ОПУ для принятия решения об его широкомасштабном тиражировании. Вместе с тем значительным препятствием при внедрении перспективного метода могут стать психологическое неприятие и неконструктивная критика его специалистами в области переработки ТБО традиционными технологиями сжигания (Шубов... №5).

13.1.4.2. Газификация и пиролиз

Из разработок в этой области одним из наиболее перспективных является процесс паро-воздушной газификации при 1200°C в плотном слое кускового материала, созданный в институте химической физики (ИХФ) РАН (г. Черноголовка, Московская обл.).

Процесс, названный авторами сверхadiaбатическим горением, первоначально (1994 г.) был реализован на заводе «Электростальтяжмаш» — также Московской области, где запустили в эксплуатацию установку обезвреживания остатков закалочных масел. Она же была опробована для переработки твердых бытовых отходов.

Способ ИХФ осуществляется в реакторе шахтного типа с внутренним диаметром 1,6 м и высотой 7,3 м (рис. 13.4). Сверху в него при соотношении 1:0,4 загружаются отходы (обычная крупность кусков не более 200 мм) и инертный материал (битый шамотный кирпич с размерами 120-70 мм). Снизу в реактор подается паро-воздушная смесь с температурой $60-80^\circ\text{C}$. Шамот аккумулирует тепло и, равномерно и постепенно отдавая его, стабилизирует температуру процесса газификации. Последний проводится при относительно малых линейных скоростях потока. Выходящий из реактора синтез-газ, содержащий водород, оксид и диоксид углерода, азот и водяной пар, сжигает-

ся в котле с топкой. Перегретый пар из котла используется для выработки электроэнергии. Теплотворная способность синтез-газа при газификации обогащенной органической фракции ТБО составляет около 1200 ккал/м^3 . При его температуре на выходе из реактора порядка 150°C обеспечивается высокий тепловой КПД технологии ИФХ.

В процессе газификации шамот, зола и шлак опускаются в нижнюю часть реактора, где с температурой 150°C выгружаются. После отсева золы и шлака шамот вместе с отходами вновь загружается в газификатор.

В 1998 г. такая же установка для утилизации ТБО введена в эксплуатацию в г. Лаппсенранта (Финляндия). Синтез-газ реактора подается в один из котлов ТЭЦ. Зола газификации вывозится на захоронение. КПД использования тепла составляет 70%, производительность установки по отходам равна 2-4 т/ч при капитальных затратах 2,5 млн дол. США. Она работает без газоочистного оборудования, так как не имеет вредных выбросов.

Преимущества технологии ИФХ: высокий тепловой КПД реактора; малый золоунос; практическое отсутствие в низкотемпературном, с восстановительным потенциалом, выходящем из газификатора синтез-газе летучих металлов, диоксинов и дибензофуранов; возможность упрощенной схемы газоочистки

или ее полного исключения.

В последнее десятилетие 20 в. значительное внимание уделялось освоению пиролиза ТБО.

На опытно-промышленной установке (г. Ulm-Viblingen, Германия) концерном «Siemens KWU» с 1988 г. испытывалась SBV-технология (Schwel-Brenn-Verfahren).

Она включает:

измельчение отходов роторными ножницами до крупности -200 мм ;

пиролиз отходов при 450°C 1 ч в барабанной печи (частота вращения 4 мин^{-1}) с обогреваемыми внутренними лопастями. Обогрев ведется дымовыми газами с температурой 600°C , отходящими от котла-

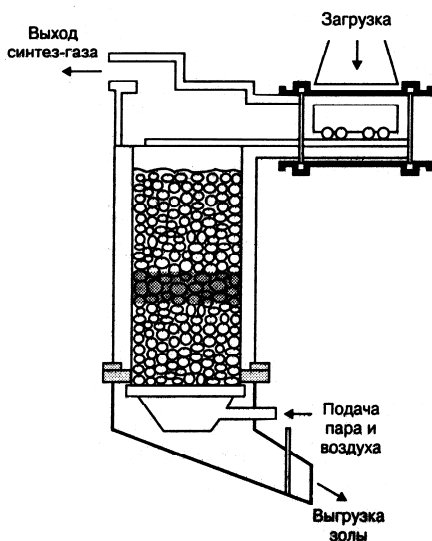


Рис. 13.4. Реактор газификации в плотном слое кускового материала без принудительного перемешивания и перемещения

утилизатора (см. далее). Продукты термообработки – пиролизный газ и твердый остаток (смесь углерода и минеральных компонентов). Углеродистую часть остатка отделяют от его минеральной составляющей грохочением. Последняя, в свою очередь, фракционируется на неметаллическую составляющую (стекло, керамика), черные и цветные металлы.

Углеродистая часть остатка измельчается до кл. -100 мкм и совместно с пирогазом поступает на сжигание при 1300°C, отходящие газы которого направляются в котел-утилизатор. Полученный в нем пар используют для выработки электроэнергии в турбогенераторе. Расплавленный шлак установки сжигания подвергают водной грануляции.

Необходимо отметить, что по технологии SBV в 1997 г. был пущен завод производительностью 100 тыс. т ТБО в год (г. Фюрт, Германия). Однако он был остановлен на неопределенный срок из-за серьезных неполадок в процессе (Шубов... №5).

Рассматриваемые далее технологии фирм «Noell» и «Thermoselect» реализуются по схеме пиролиз-газификация с использованием на второй стадии обогащенного кислородного дутья.

Технология «Noell» отрабатывалась на ОПУ г. Фрейбург (Германия).

Головная часть схемы (пиролиз при 550°C) в значительной степени аналогична применяемой в SBV. Отличие состоит в том, что минеральные компоненты не отделяются от твердой углеродистой части остатка пиролиза, а совместно с последней измельчаются и поступают сверху в газификатор цилиндрической формы. Сверху же подают технический кислород, охлажденный пирогаз, жидкие продукты пиролиза (масла, воду). Температура верхней зоны газификатора (не менее 1300°C) достаточна, чтобы расплавить минеральные вещества, содержащиеся в исходных отходах.

Расплавленный шлак и синтез-газ поступают в нижнюю зону газификатора, где охлаждаются впрыскиваемой водой до 150-210°C. В этих условиях шлак гранулируется и удаляется через нижний шлюзовый затвор газификатора. Газ очищается от соединений серы в мокром скруббере и далее используется для энергетических целей.

Технология «Thermoselect» (Италия-Швейцария) предусматривает, что углеродистый остаток пиролиза не разделяется на фракции и целиком направляется на газификацию. Способ апробирован на ОПУ производительностью ~100 т/сут. (г. Fondotoce, Италия).

В соответствии с рассматриваемой технологией, исходные ТБО последовательно подвергают дроблению, прессованию и затем направляют на пиролиз при 600°C в аппарате туннельного типа длиной 15 м. Из пиролизной печи газ, а также твердый углеродистый остаток вместе с минеральными компонентами, включая металлы, поступает в реактор газификации вертикального типа. В него же подается и кислород.

Газификация протекает в нижней части реактора, температура при этом повышается до 2000°C. Образовавшийся расплав стекает на подгазификатора, где разделяется на металлическую и шлаковую фазы, выпускаемые раздельно. Синтез-газ выводится из верхней части реактора при 1200°C, охлаждается и далее сжигается с утилизацией энергии.

Основные недостатки процесса «Thermoselect»: загрязнение синтез-газа летучими металлами (Pb, Cd, Hg, Sn) и связанное с этим усложнение газоочистки; проблематичность утилизации металлического расплава вследствие пестроты его химического состава и малого количества.

По технологии «Thermoselect» строился завод производительностью 220 тыс. т/год ТБО (г. Карлсруэ, Германия) со сроком начала эксплуатации в 2000 г.

Помимо утилизационных способов, пиролиз ТБО можно реализовать как индустриальный. Например, ТБО смешивают с вязкотекучими отходами коксохимического производства в соотношении 1:1, смесь в количестве 0,8-1,0% подают в угольную шихту, которая поступает в коксовые печи металлургического производства (Способ...).

13.1.5. Комплексная переработка

Опыт переработки твердых бытовых отходов показывает, что универсального метода, удовлетворяющего требованиям экологии и экономики, не существует. Этим требованиям в наибольшей степени соответствует концепция комплексного использования ТБО с применением совокупности процессов сортировки, термо- и биометодов. Подтверждением современной технической политики является пуск в 1997 г. завода «Робинз» производительностью 500 тыс. т/год отходов (разд. 13.1.4.1). Технология комплексной переработки внедрена, кроме США, и в других странах (Италия, Бельгия, Япония, Германия и т.д.). Практикуемые при этом схемы весьма разнообразны, но в принципе можно выделить ряд обычно включаемых технологических операций.

Обязательной в комплексной переработке ТБО является сортировка, изменяющая их качественный и количественный состав. Она же ускоряет процесс ферментации органических веществ отходов, облегчает очистку продукта ферментации от примесей и повышает его качество, улучшает сжигание и газоочистку. Это обусловлено тем, что сортировка почти вдвое может сократить материальные потоки, поступающие на сжигание и компостирование. В то же время капитальные затраты на нее не превышают 15% от требуемых на термо- и биообработку.

Не случайно в США вступил в силу закон (1992 г.), в соответствии с которым запрещается доставка ТБО на свалки и мусоросжигательные заводы без предварительной сортировки.

В общем случае рациональная схема механизированной сортировки твердых бытовых отходов должна предусматривать:

извлечение в самостоятельные продукты черных и цветных металлов; разделение потока на две фракции — горючую и биоразлагаемую (соответственно для термообработки, биообработки или захоронения); удаление опасных и части балластных отходов.

В зарубежной практике сортировка ТБО чаще всего начинается с отсева в барабанных грохотах с диаметром отверстий 100 мм. По данным отечественной практики, такая операция неэффективна вследствие забивания отверстий барабана текстильными и влажными компонентами.

Полагают, что специфичность отечественных бытовых отходов исключает механическое перенесение в российские условия западных технологий сортировки без соответствующей адаптации к ним. Такая адаптированная, по мнению Л.Я.Шубова с соавторами, технология была разработана в ВИВРе (Концепция...) и испытана на потоках ТБО мощностью около 15 т/ч.

Технологию ВИВРа отличают две операции, предшествующих грохочению (магнитная сепарация и удаление из потока текстильных и крупных пленочных компонентов). Последнее осуществляется в аппарате оригинальной конструкции, в котором происходит также рыхление материала. Отмеченные операции оптимизируют последующее грохочение по кл. 250 мм.

Второе отличие отечественной технологии — регулирование основного потока отходов (65-70% от исходного) с помощью воздушной сепарации. Это позволяет оптимизировать последующие операции сортировки, улучшить санитарно-гигиенические условия работы (дезодорация, обеспыливание), подсушить компоненты легкой фракции (рис. 13.5).

Включение в технологическую схему операций дробления крупных фракций ТБО определяется требованиями последующей переработки. В частности, для слоевого сжигания дробление не требуется, при использовании кипящего слоя или технологии газификации оно обязательно.

Поясним редко встречающееся в курсах обогащения полезных ископаемых понятие «электродинамическая сепарация».

Электродинамическая сепарация основана на том, что при движении электропроводного металла в переменном поле или при действии на неподвижный электропроводный металл переменным, например бегущим, магнитным полем в проводнике индуцируется ЭДС и возникают вихревые токи. Взаимодействуя с первичным магнитным полем, они изменяют направление движения металла, выводя его из

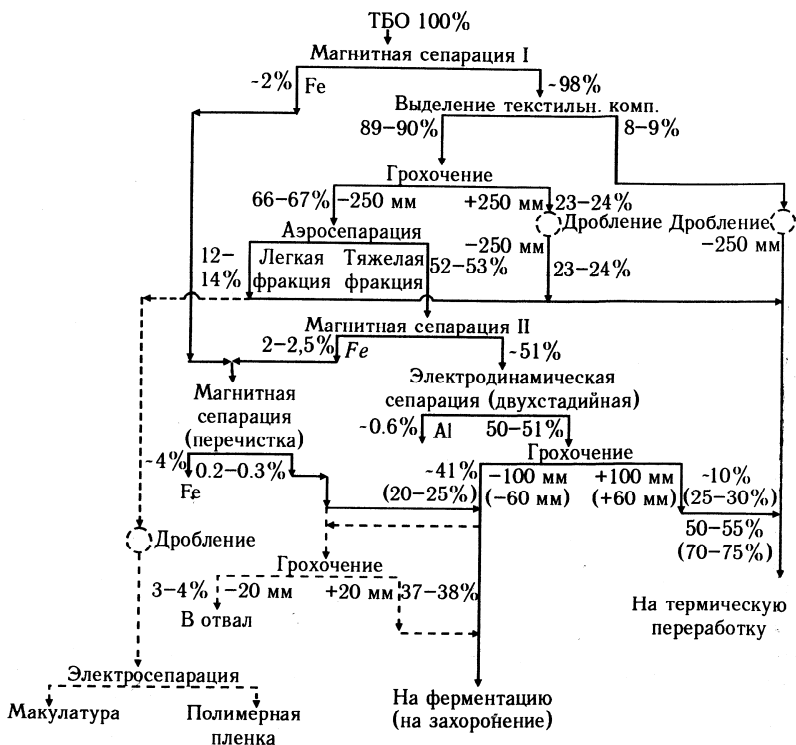


Рис. 13.5. Технологическая схема сортировки ТБО

общей массы материала. Иными словами, электродинамическая сепарация тождественна электромагнитной.

Обычно этот вид обогащения используется для извлечения цветных металлов, прежде всего алюминия и меди, после выделения из отходов магнитной сепарацией черных металлов. Практика показывает, что для повышения степени извлечения цветных металлов электродинамическая сепарация должна проводиться в несколько стадий (основная и контрольные операции). Выделенный концентрат для удаления примесей необходимо подвергать перечистой электромагнитной сепарации (Шубов...).

В целом технология ВИВРа обеспечивает высокое извлечение черных (95-98%) и цветных (около 85%) металлов в самостоятельные продукты, удовлетворяющие российским стандартам, выделение макулатуры, полимерной пленки, органической фракции. Все выделенные материалы поступают в последующую утилизацию.

Из термических способов в схему комплексной переработки ТБО наиболее целесообразно включать отечественную технологию ИХФ (паро-воздушная газификация) или слоевое сжигание с применением оборудования германских фирм.

Схемы комплексной переработки ТБО, включающие стадии их сжигания, могут предусматривать использование образующихся топливных зол и шлаков, например при производстве цемента, строительных материалов, ремонте и прокладке дорог.

Новым и эффективным направлением является применение подготовленных ТБО в качестве технологического топлива в цементных печах.

Из биотермических технологий предпочтительна ферментативная сушка в туннеле. В общем случае, в зависимости от вида биотермической обработки, можно получить готовый для реализации продукт (стабилизированная органическая фракция для использования, например в растениеводстве, при рекультивации земель и т.п.) или полупродукт (направляется на термическую переработку). Следует при этом отметить, что применение компоста из ТБО в качестве удобрения в некоторых странах, например Германии, законодательно запрещено, а в других признано нецелесообразным.

Одна из зарубежных технологий комплексной переработки ТБО включает в себя биологическую сушку отходов в закрытых бетонных боксах за счет тепла, выделяющегося при гниении отходов, с последующим механическим разделением продукта на металлы, минералы и не содержащую вредных веществ горючую часть, которая будет использоваться на близлежащем цементном заводе (Herhof...).

Действующий мусороперерабатывающий завод Санкт-Петербурга также включает стадию биотермической переработки. Из поступающих на утилизацию отходов на заводе выделяют цветные и черные металлы, макулатуру, текстиль, стеклобой, полимерную фракцию. Органическая часть биотермией переводится в компост, некомпостируемые остатки подвергают пиролизу с получением углеродсодержащих продуктов, используемых в металлургии, резинотехническом и асфальтовом производствах (Лихачев...).

В последнее время для предварительной комплексной переработки ТБО предложена передвижная установка на железнодорожной платформе (Комплекс...).

13.1.6. Экономическая эффективность утилизации

В расчетах использованы данные работы «Концепция...» Л.Я.Шубова с соавторами, взятые из предложений правительству

Москвы в 1991-1992 гг. от фирм Германии, Франции, Италии, Великобритании, а также из отчета международной ассоциации ISWA (Working Group on Waste Incineration, Nov. 1991 г.) и разработки Научно-исследовательского центра Госкомэкологии РФ по проблемам управления ресурсосбережением и отходами.

Для анализа выбраны технологии сжигания, компостирования, сортировки и их комбинации. Условная производительность завода по ТБО 240 тыс. т/год (обслуживается около 1 млн жителей). Результаты расчетов приведены в табл. 13.3.

Дадим некоторые пояснения к таблице:

1. Расчеты выполнены в долларах США на 1 т ТБО;
2. Комплексная переработка включает комбинации сортировки, компостирования и сжигания;

3. Технология «сортировка+компактирование» предусматривает вовлечение в утилизацию только отходов нежилого сектора;

4. В строках 1-5 табл. 13.3 использованы данные вышеупомянутой работы Л.Я.Шубова с соавторами, в строках 6-9 представлены расчеты автора по следующим выражениям:

$$\mathcal{E}_{KB} = \frac{P - C}{K}, \quad (13.1)$$

где P — результат; C — эксплуатационные затраты, равные сумме C_1 и C_2 (обозначения в табл. 13.3).

$$R = P - C, \quad (13.2)$$

где R — чистый экономический эффект за пределами срока окупаемости капитальных вложений;

5. Срок τ окупаемости капитальных вложений равен $1/\mathcal{E}_{KB}$.

Расчеты автора выполнены в двух вариантах:

а) результат равен цене реализованной продукции, ТБО принимаются на утилизацию по нулевой стоимости как для поставщика, так и для переработчика;

б) результат равен сумме стоимости реализации продукции и тарифа за приемку заводом отходов. Тариф рассматривается как оплата налогоплательщиком одного из видов коммунальных услуг и, в соответствии с практикой развитых стран, составляет 50-60 дол./т ТБО (принято 50 дол./т).

В первом варианте приемлемый срок окупаемости (стр. 7) имеет только технология сортировка+компактирование (3,6 г.). Способы сжигания, сортировка+сжигание, комплексная переработка характеризуются длительным сроком окупаемости (16,7-55,5 г.), намного превышающим средние нормативы по народному хозяйству России (8,3 г.). Технологии компостирования и сортировки+компостирование

не окупаемы, поскольку сумма эксплуатационных затрат (C_1+C_2) превышает стоимость реализации продукции.

Таблица 13.3

Экономическая эффективность различных технологий
переработки ТБО

| №№ п/п | Показатели | Сжигание | Компостир. | Сортировка + сжигание | Сортировка + компостир. | Комплекс. пере- работка | Сортировка + компактир. |
|--------|--|----------|-------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. | Кап. вложения (К) | 280 | 90 | 330 | 100 | 240 | 44 |
| 2. | Эксплуатационные затраты (C_1) | 9,6 | 10 | 12,8 | 8,7 | 13,5 | 3,5 |
| 3. | Неутилиз. фр. (для захор.), % от ТБО | 30 | 30 | 15 | 55 | 8 | 60 |
| 4. | Эксплуатац. затра- ты на захор. (C_2) | 9 | 9 | 4,5 | 16,5 | 2,4 | 18 |
| 5. | Стоимость реализ. продукции | 23,7 | 9,2 | 33,9 | 18,7 | 30,2 | 34 |
| 6. | Абсол. эконом. эфф-ность кап. вложений (Θ_{KB}) | 0,018 | отр. | 0,05 | отр. | 0,06 | 0,28 |
| 7. | Срок τ окуп-сти кап. вложений, лет | 55,5 | не окуп. | 20,0 | не окуп. | 16,7 | 3,6 |
| 8. | То же, при оплате приемки ТБО | 5,1 | 2,2 | 5,0 | 2,3 | 3,7 | 0,8 |
| 9. | R по п. 8 | 55,1 | 40,2 | 66,6 | 43,5 | 64,3 | 62,5 |

Таким образом, если заводы не оплачивают услугу по переработке отходов, то рассматриваемые технологии применительно к ТБО жилого сектора неэффективны (имеют длительные сроки окупаемости или не окупаемы).

Эффективность технологий кардинальным образом повышается при оплате услуги за переработку ТБО. В этом случае для всех рассматриваемых способов сроки окупаемости капитальных вложений практически не превышают 5 лет. Наименьший из них, как и в первом варианте, у схемы сортировка+компактирование для отходов нежилого сектора (0,8 г.).

Применительно к ТБО наибольший R (чистый экономический эффект за пределами срока окупаемости вложений) имеют технологии

сортировка+сжигание и комплексной переработки. Однако в поддающийся прогнозу период времени наибольший суммарный (за все годы) R накапливается у варианта сортировка+компактирование. Об этом свидетельствует число лет (n) за пределами срока окупаемости, необходимое для получения равного суммарного R соответственно по технологиям 6 и 5, 6 и 3.

Очевидно, что для пары технологий 6 и 5 равный суммарный R достигается при условии, что:

$$(64,3 - 62,5) n = 62,5 (3,7 - 0,8).$$

Здесь использованные численные значения представлены в строках 8 и 9 табл. 13.3. Из условия следует, что $n = 100,7$ г.

Повторив рассуждения для пары технологий 6 и 3, найдем n равным 64 г.

Ясно, что сроки порядка 64 и 100,7 г. свидетельствуют о том, что в подающемся реальному прогнозу будущем (около 20-25 лет для технологических решений) наиболее эффективной останется схема сортировка+компактирование, обеспечивающая наибольшую суммарную R и предназначенная для утилизации отходов нежилого сектора.

Из технологий переработки ТБО жилого сектора наименьший срок окупаемости у компостирования (2,2 г.). По отношению к нему равный суммарный R других технологий, имеющих более высокий чистый R , достигается в течение, лет: сжигание — 7,8; сортировка+сжигание — 4,3; сортировка+компостирование — 1,2; комплексная переработка — 2,5.

Из этого следует, что не позднее первых десяти лет по любой из рассмотренных технологий суммарный R превысит получаемый при компостировании. Наибольшую разницу с последним по R имеют технологии сортировка+сжигание (26,4 дол./т) и комплексной переработки (24,1) при близких сроках окупаемости (соответственно 5,0 и 3,7 лет). Число n лет, в течение которых технология сортировка + сжигание сравнивается по суммарному R с комплексной переработкой, определяется из выражения:

$$(66,6 - 64,3) n = 64,3(5,0 - 3,7).$$

Данные для расчета взяты из строк 8 и 9 табл. 13.3. Отсюда $n = 36,3$ г.

Таким образом, только через (36,3+3,7), т.е. 40 лет, сортировка+сжигание может сравниться по R с комплексной переработкой. Практически это означает, что в реально прогнозируемые сроки для жилого сектора наиболее эффективной по R является комплексная переработка ТБО.

Отметим, что устранение в выполненных автором выкладках просчета цитированной выше работы Л.Я.Шубова с соавторами (произвольное установление срока окупаемости капитальных вложений, равного 10 г., в то время, когда весь смысл расчета заключается в

нахождении этого срока) приводит к существенно другим выводам. Оказывается, в частности, что некоторые технологии утилизации ТБО могут окупаться только за счет стоимости реализованной продукции. При оплате заводом услуги по переработке ТБО практически все распространенные технологии их утилизации становятся весьма эффективными, со сроком окупаемости, не превышающим 5 лет.

Размер оплаты заводу услуги по переработке отходов заслуживает отдельного рассмотрения. Представляется, что для нашей страны ее разумный уровень — стоимость платежей предприятия за размещение ТБО.

Более новые экономические расчеты по утилизации отходов приведены в работе Е.В. Федорова.

Зарубежные технико-экономические показатели конца 20-го и начала 21 в. по компостированию, сжиганию, депонированию на полигонах, анаэробному сбраживанию и другим методам переработки отходов приведены Д. Модом и Н. Ногг с соавторами.

13.2. Медицинские отходы

Количество медицинских отходов сравнительно невелико. В США, например, они составляют около 3% всех отходов. Однако по мере роста числа медицинских учреждений масса этих материалов в развитых странах в последнее десятилетие 20 в. быстро возрастала. Так, во Франции только больничных отходов генерируется порядка 700 тыс. т/год и обработка их обходится в 1 млрд франков. По своим физико-химическим характеристикам медицинские отходы близки к бытовым, но степень их опасности выше. Проблема заключается и в большом разнообразии веществ, образующих эти материалы и требующих различного подхода к их обезвреживанию. В них присутствуют многие токсичные, наркотические и радиоактивные вещества, мутагены и канцерогены. Массовая доля их невелика, но при переработке некоторые из них, в частности ртуть и другие тяжелые металлы, могут накапливаться в отдельных частях оборудования и продуктах сжигания. Однако главная опасность состоит в том, что, например, в больничных отходах общее количество микроорганизмов более чем в 1000 раз превышает их содержание в ТБО. Эти же материалы, как отмечает И.Ф.Курунов, служат одним из основных источников поступления диоксинов и фуранов в окружающую среду при сжигании: более 14% в странах ЕС; уступают только МСЗ (28,6) и агрофабрикам (17,6). В нашей стране количество медицинских отходов составляет 0,6-1,0 млн т.

Наличие болезнетворных бактерий, вирусов и других микроорганизмов определяет принципиальную вредность всех медицинских отходов.

К специфическим медицинским отходам, достигающим более 20% всего больничного мусора, относятся перевязочные материалы (бинты, вата, салфетки); операционные отходы (иссеченные органы, кожные лоскуты, эмбрионы, ампутированные конечности); металл (сломанные медицинские инструменты, проволочные шины, иглы для шприцев); стекло (ампулы, банки, флаконы и т.п.); резина, кожа, пластики (операционные перчатки, трубки, грелки, рентгеновская пленка и т.д.); гипсовые повязки.

Известны различные технологии переработки и обезвреживания больничных отходов.

В ряде стран Европы и США используют процесс, позволяющий превращать больничные отходы в совместимые с бытовыми. Обработку ведут перегретым паром в течение 16 мин. после измельчения.

Фирма «Teschet» (Германия) создала установку для ежегодного рециклинга 12 млн стеклянных ампул, заполненных лекарствами с истекшим сроком годности. Технология позволяет регенерировать растворы и стекло после разделения (*Муниципальные...*).

Тем не менее основным методом уничтожения и утилизации вредных медицинских и аналогичных отходов является сжигание. Его рекомендуют СанПиН, справочники и другие источники информации. Лишь канализируемые отходы инфекционных отделений иногда подвергаются промежуточной термомеханической обработке.

Первые печи термического обезвреживания медицинских отходов в нашей стране были созданы в 60-х гг. 20 в.

Подавляющая часть больниц нашей страны оборудована простейшими мусоросжигательными печами, представляющими собой железные ящики, иногда метровых размеров. Часто они имеют внутреннюю футеровку из огнеупорного или простого обожженного кирпича и дверцы для загрузки топлива и отходов на металлическую колосниковую решетку. Через отверстия последней поступает воздух из поддувала, объединенного обычно с золосборником. Над решеткой или сзади нее располагается дымовая труба.

Большая часть больничных отходов вследствие низкой теплотворной способности (менее 8 кДж/кг) и высокой влажности (30%) автогенно не сгорает. Для их нагрева и сжигания в малых больничных мусоросжигательных печах используется дополнительное топливо (дрова, уголь). Очень часто процесс сжигания в них затягивается из-за низкой температуры (600-900°C). Это приводит к недожогу материала и загрязнению атмосферы, так как очистка отходящих газов малых печей обычно не предусматривается.

В последние годы для ликвидации медицинских отходов стали применять современные технологии и оборудование высокотемпературного сжигания. За рубежом они достаточно быстро окупаются, поскольку стои-

мость услуг по уничтожению медицинских и других вредных отходов быстро растет в связи с ужесточением природоохранного законодательства.

Такая переработка ведется, например, на заводе «Dortmagen» (ФРГ), где больничные материалы утилизируют наряду с другими жидкими и твердыми отходами. Процесс осуществляют при 900°C в барабанной печи, снабженной камерой дожигания отходящих газов при 1200°C. Далее их используют для получения пара (200 тыс. т/год).

Применительно к отечественной практике отметим технологическую схему установки с барабанной печью фирмы «Ватад» (Германия). Она включает камеру дожигания в печи, испарительное охлаждение газов (скруббер, рукавный фильтр — скруббер Вентури — дымовая труба) (Бернадинер).

Одна из последних разработок предусматривает: прямоточную цилиндрическую камеру сгорания с температурой внутри нее до 2000°C; подогрев до 500-600°C воздуха, обогащенного кислородом, для сжигания; дожигание отходящих газов на выходе из печи; паротрубный к/у; расположенный за к/у энергетический блок (паровая турбина и электрический генератор); газоочистку (циклон, мокрый скруббер, электропылевой фильтр). Жидкие продукты сгорания (шлак и металл) выпускаются из печи, охлаждаются и могут быть утилизированы, например при производстве строительных материалов и выплавке металлов. При производительности по отходам 100 кг/ч энергетический блок имеет мощность 150 кВт. Водообеспечение установки обратное (Высокотемпературная...).

Перспективным вариантом сжигания представляется также плазменный нагрев.

Плазму получают, нагревая газ до температуры более 4000°C. Для этого на газ (водород, азотно-водородная смесь и т.п.) воздействуют электрической дугой в специальных аппаратах — электродуговых плазмогенераторах, или плазмотронах. Плазма представляет собой вещество в сильно ионизированном состоянии, с примерно равной концентрацией положительно и отрицательно заряженных ионов.

Образующаяся низкотемпературная плазма поступает в плазмохимический реактор. При ее смешении с отходами происходит их термическое разложение с пиролизом и плавлением образующихся продуктов. Необходимый температурный уровень в печи регулируется количеством подаваемой в нее плазмы. Применительно к медицинским отходам он составляет 1500°C и более.

Первая в России установка обезвреживания отходов медицинских учреждений в плазменной печи была построена на территории Московской городской инфекционной клинической больницы №1. Технология реализована в двухкамерной кессонированной, с плазменным обог-

ревом подсводового пространства, электродуговой печи. Несортированные отходы (одноразовые шприцы, иглы, скальпели, системы переливания крови, отходы операций, аптек, других лечебно-профилактических учреждений) сжигают и расплавляют с получением жидких шлаков и металла, пригодных для дальнейшего использования. Процесс переработки полностью механизирован (Гонопольский...).

Вслед за первой появились и другие плазмотермические установки. Мощность плазмотронов в них достигает 1 МВт при производительности по отходам 250 кг/ч и расходе электроэнергии 0,6-0,7 кВтч/кг. Схема очистки отходящих газов: скруббер-охладитель, рукавный фильтр, мокрый скруббер для удаления кислых компонентов при пропуске газов через щелочной раствор. При использовании данной схемы и дожигании отходящих газов концентрации NO_x и CO в них не превышают 500 ppm (Плазмотермическая...; *Плазмотермическое...*).